

La resistenza alle deformazioni permanenti dei conglomerati bituminosi

Alcune metodologie dei simulatori di traffico

The resistance to permanent deformations of the asphalt mix.

Some methodologies related to traffic simulators

SABRINA GRILLINI, ETTORE VOLTA B. G.

Dicam, Università di Bologna

Riassunto

Per la verifica del comportamento di una pavimentazione bituminosa nei riguardi del fenomeno della produzione delle ormaie possono essere condotti appropriati studi sperimentali. Per fare ciò è necessario determinare l'entità della deformazione permanente che il conglomerato bituminoso dei vari strati subisce quando è sottoposto a ripetute applicazioni di uno stato tensionale del tipo di quello provocato dai carichi trasmessi dalle ruote dei veicoli.

I dati possono ottenersi da prove di creep statico, da prove d'impronta, da prove di creep dinamico e da prove di *wheel tracking* in laboratorio sugli stessi materiali che compongono il pacchetto stradale.

Nell'articolo si illustrano alcune metodologie usate per simulare il traffico veicolare ed una sintesi sperimentale effettuata con il criterio WTM (*Wheel Tracker Machine*).

Summary

Experimental studies also examine the behavior of bituminous pavement towards the production of the phenomenon of rutting. In order to make this, it is necessary determine the entity of permanent deformation that the asphalt layer undergoes when it is subjected to repeated stress states such as the one caused by the loads transmitted directly by the wheels of the vehicles. The data can be obtained in different ways: by static creep tests, by test impression, by creep dynamic and wheel tracking tests made in laboratory on some materials that compose the road package.

*The article shows some methodologies used to simulate the vehicular traffic and an experimental synthesis carried out with the criterion WTM (*Wheel Tracker Machine*).*

1. Premessa

La tesi svolta nell'A.A. 2007-2008 ha riguardato lo studio sperimentale per la caratterizzazione della resistenza alle deformazioni dei conglomerati bituminosi impiegati nella sovrastruttura della linea TPGV (Civis) di Bologna. Il Civis è un programma attuato da ATC, l'azienda di trasporto pubblico di Bologna e provincia, in collaborazione con il Ministero dei Trasporti, la Regione Emilia-Romagna, la Provincia di Bologna, il Co-

mune di Bologna ed il Comune di San Lazzaro di Savena. Il progetto prevede il collegamento tra San Lazzaro di Savena e il centro storico di Bologna, adottando il sistema di trasporto denominato TPGV, acronimo di Trasporto Pubblico a Guida Vincolata.

Una particolare attenzione è stata rivolta allo studio del tappeto di usura in SMA (Splittmastixasphalt) ed in particolare alla formazione di ormaie a causa del passaggio ripetuto delle ruote in una fascia di pavimentazione strettamente limitata. »

2. Introduzione

Il comportamento viscoelastico e termoplastico delle miscele bituminose a caldo (*Hot Mix Asphalt*) espone la pavimentazione, sotto l'azione del traffico e delle condizioni ambientali, al rischio di deformazioni permanenti (*rutting*) che possono compromettere la regolarità del piano di via.

Il meccanismo di ormaimento si sviluppa progressivamente con l'accrescere del numero di passaggi della ruota creando solchi longitudinali sulla piattaforma. Questi ultimi, se fortemente pronunciati, generano un effetto tipo "rotaia", proponendo traiettorie "obbligate" al veicolo in marcia e creando siti privilegiati di accumulo d'acqua meteorica.

Queste circostanze, in relazione alla loro accentuata relazione con la sicurezza del moto, unitamente alla complessità del fenomeno stesso, hanno incentivato lo sviluppo di metodologie (e strumentazioni) atte a studiare, in sede previsionale, l'attitudine delle miscele di conglomerato bituminoso a deformarsi "plasticamente". Nella caratterizzazione dell'evoluzione del degrado, il fenomeno del *rutting* viene analizzato ricorrendo a "simulatori di traffico" o macchine ormaiole capaci di riprodurre, a scala più o meno ridotta, ed in determinate condizioni di prova, l'azione "deformante" del carico veicolare (ruota viaggiante).

3. Simulatori di traffico

Le prove dette "simulative" consentono di riprodurre scenari tenso-deformativi del materiale affini a quelli di esercizio.

Le prove sono realizzate attraverso dispositivi (macchine ormaiole) in grado di riprodurre, a scala più o meno ridotta e sotto determinate condizioni operative, l'azione deformante del carico veicolare.

Tali prove permettono di determinare la deformazione subita dal provino nel tempo (*rut depth*) in funzione dei cicli di sollecitazione.

I principali simulatori di traffico oggi in uso in ambito internazionale sono:

- ▶ APA (*Asphalt Pavement Analyzer*);
- ▶ HWTM (*Hamburg Wheel Tracking Device*);

- ▶ FRT (*French Rutting Tester*);
- ▶ WTM (*Wheel Tracker Machine*).

3.1 APA (*Asphalt Pavement Analyzer*)

L'APA (**Fig. 1**) è un dispositivo di seconda generazione che è stato originariamente sviluppato nel 1980 ed è utilizzato per misurare e prevedere la deformazione permanente delle pavimentazioni stradali.

L'APA è dotata di una ruota in alluminio che agisce sui provini attraverso un tubo flessibile in pressione che simula il carico trasmesso dal traffico veicolare.



Fig. 1 Dispositivo APA

I campioni di prova possono essere lastre o provini, climatizzati in aria o in acqua ad una temperatura costante di circa 40 gradi. Su tali campioni la ruota effettua 8.000 cicli (2 ore e 15 min) con un carico pari a 445 N ed una pressione del tubo pari a 690 kPa.

La deformazione permanente viene misurata in continuo al centro del provino ed è espressa in mm.

3.2 HWTM (*Hamburg Wheel Tracking Device*)

L'HWTM (**Fig. 2**) è un dispositivo tedesco che viene utilizzato per valutare la suscettibilità all'ormaiamento delle miscele bituminose. Con questa macchina la ruota



Fig. 2 Dispositivo HWTD (Hamburg Wheel Tracking Device)

d'acciaio è posta direttamente a contatto con il campione di forma prismatica. Tale provino è immerso in acqua, ad una temperatura costante pari a circa 50 °C, ed è sottoposto ad un carico pari a 705 N per 20.000 cicli (o fino a 20 mm di deformazione). La profondità dell'ormaia è misurata in continuo sul campione.

Il grafico successivo (Fig. 3) mostra un tipico diagramma che si ottiene da una prova di tipo HWTD, che determina la profondità dell'ormaia, misurata in mm, in funzione del numero di cicli.

Dalla Fig. 3 si possono determinare i seguenti parametri:

- **Post-compattazione.** Fino a 1.000 cicli di carico il provino si continua a compattare in maniera costante.

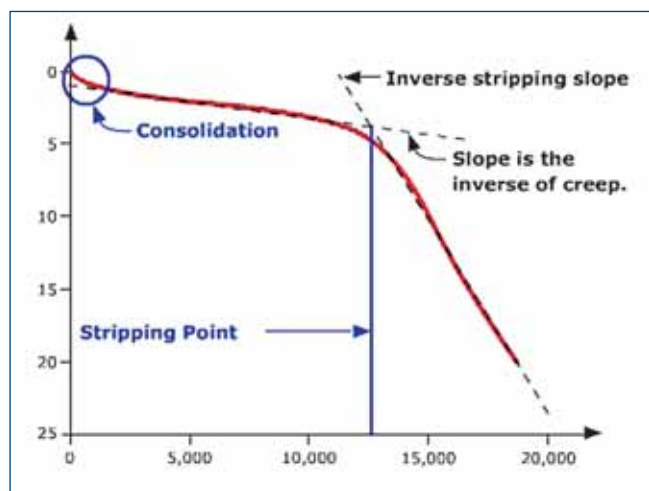


Fig. 3 Profondità dell'ormaia (mm) in funzione del numero di cicli

- **Creep slope.** Dopo 1.000 cicli ha inizio la prova e durante tale periodo si misura la deformazione permanente fino al punto di *stripping*. Inoltre, da numerose prove di laboratorio è risultato che se il punto di inflessione avviene ad un basso numero di cicli di carico (meno di 10.000) la miscela è suscettibile prevalentemente a danni dovuti all'umidità.
- **Stripping slope.** Dopo il punto di *stripping* la profondità dell'ormaia aumenta notevolmente all'aumentare del numero di cicli. In questa fase non è possibile separare gli effetti di umidità dai fenomeni viscosi che agiscono sul provino.

3.3 FRT (French Rutting Tester)

Il *French Rutting Tester* (Fig. 4) è un dispositivo studiato nel laboratorio *Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) ed è utilizzato da oltre 15 anni per valutare le caratteristiche delle miscele bituminose.

Il FRT è caratterizzato da un pneumatico gonfiato a 600 kPa che compie 30.000 cicli su una lastra compattata con compattatore a piastra alla quale trasmette un carico di circa 500 N. Il FRT produce risultati non attendibili per miscele con aggregati di diametro superiore a 20 mm poiché la larghezza della lastra è relativamente piccola rispetto alla larghezza del pneumatico, inoltre la miscela provoca un deterioramento tale alla ruota da fare risultare la prova inattendibile.

Nel medesimo laboratorio di *Ponts et Chassées*, a Nantes, si possono effettuare delle prove di *wheel tracking*



Fig. 4 Dispositivo FRT (French Rutting Tester)

su scala reale e nel 1999 sono state effettuate diverse prove per mettere a confronto tre nuove tipologie di sistemi di trasporto urbano su pneumatico:

- ▶ Translohr: è un sistema di trasporto a guida vincolata su gomma, spesso chiamato "tranvia su gomma"; è prodotto in Francia dalla Lohr.
- ▶ Civis: è un veicolo filo-snodato a tre assi a guida ottica in fase di realizzazione a Bologna.
- ▶ TVR: sfrutta per la guida del veicolo un'unica rotaia posta al centro della corsia di marcia.

Le prove a fatica compiute sulla struttura oggetto della sperimentazione hanno come risultato la formazione e la rilevazione delle ormaie generate dai sistemi di trasporto sopra elencati in funzione di diverse configurazioni di carico. L'apparecchiatura di prova è formata da quattro bracci (Fig. 5) dove ognuno di questi è rap-



Fig. 5 Apparecchiatura di prova FRT al Ponts et Chassées, Nantes

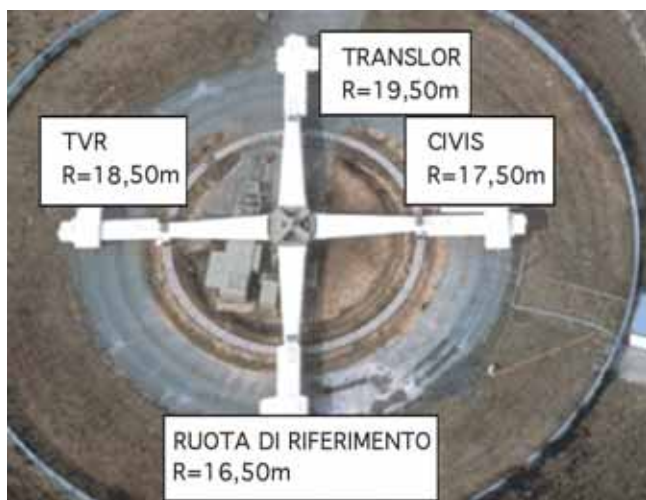


Fig. 6 Anelli di prova FRT

presentativo di un sistema di trasporto attraverso una ruota di riferimento.

Lo scopo è quello di simulare, per un periodo di prova che varia da tre a quattro mesi, il carico che grava sulla struttura per una durata di tempo da 15 a 20 anni.

Sono state costruite 3 piste (anelli) di prova e il carico durante la sperimentazione viene mantenuto costante. Per ogni anello si hanno quattro bracci con raggi tutti differenti, come mostrato in Fig. 6.

La velocità scelta per eseguire la prova è di 6,5 giri al minuto che corrisponde a:

- ▶ 47,8 km/h per un raggio di 19,5 m (Translohr);
- ▶ 40,3 km/h per un raggio di 16,5 m (ruota di riferimento).

La tipologia di pavimentazione sulla quale sono state eseguite le prove, in funzione dei vari settori, è rappresentata in Fig. 7.

La prova è iniziata il 12 luglio ed è finita l'8 settembre del 1999. La deformazione permanente è condizionata dalla temperatura, per questo motivo la prova veniva fermata quando si superavano i 30 °C ed era eseguita solo nei giorni di bel tempo, dalle 11 di mattina alle 20 di sera.

Le misure di profondità dell'ormaia sono state effettuate in 17 punti sull'anello di prova, in 5 punti sulla carreggiata della ruota di riferimento ed in 2 punti per ogni carreggiata degli altri tre bracci.

I risultati ottenuti con riferimento al Civis, per ogni configurazione di carico riferita al raggio di rotazione sono riassunte nella Tab. 1 e nella curva di evoluzione (Fig. 8).

	Secteur I BB 0/14 à 5,5% de bitume 35/50	Secteur II EIL BB + coulis ciment	Secteur III GERLAND 2,5 BBTM 0/6	Secteur IV SCREG 2,5 BBTM 0/6	4,5 BB 0/10 metalflex
T5		6 cm BB 0/10	6 cm BB 0/14		
T4	10 cm BB	7 cm BB	7 cm GB	10,5 cm GB	9,5 cm BB 0/14
T3					7,5 cm BB 0/14
T2			10 cm GB		
			15 cm GB		
T1			15 cm GB		
			40 cm GRH		
			20 cm 80/100		

Fig. 7 Pavimentazione sulla quale sono state eseguite le prove, in funzione dei vari settori

Tab. 1 Risultati della prova di ormaimento del Civis

carreggiata	settore	tipologia	deformazione (mm)	media deformazione (mm)
4a	4	SCREG	2,0-3,5-3,0-4,0	3,1
4b	4	SCREG	5,0-4,5-4,5-5,0	4,7
2b	2	EIL	2,5-2,5-3,0-3,0	2,7
3a	3	GERLAND	4,0-3,0-3,0-3,5	3,3
3b	3	GERLAND	4,0-3,5-6,0-6,0	4,8

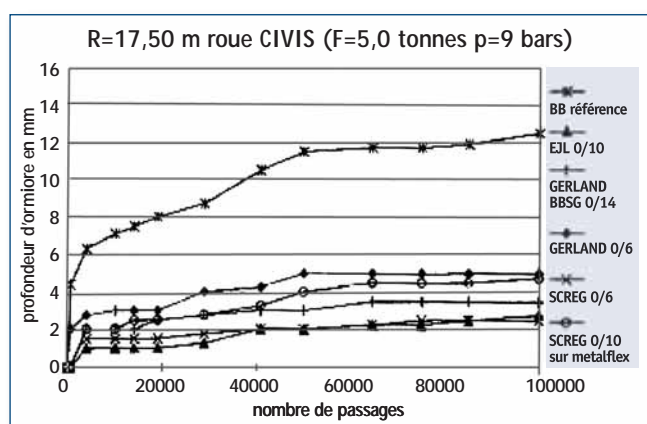


Fig. 8 Risultati della prova di ormaimento del Civis

Per le differenti carreggiate, le profondità delle ormaie misurate in cinque punti, per i diversi raggi, sono riportate in Tab. 2.

Tab. 2 Profondità delle ormaie misurate in cinque punti, per i diversi raggi

Raggi (m)	Ruota	Risultati (mm)	Media
19,5	Translohr	10,5-10,5-13,0-8,5-10	10,5
18,5	TVR	15,0-14,0-17,5-12,0-14,0	14,5
17,5	Civis	12,0-14,0-14,0-12,5-10,0	12,5
16,5	Référence	13,0-15,0-14,0-18,0-15,5	15,1

In generale si può notare che la profondità delle deformazioni permanenti sono minori per il Civis e il Translohr rispetto alla ruota di riferimento e il TVR.

Per quanto riguarda l'insieme carreggiata - carico - ruota di riferimento si è osservato che con il procedere della prova si ha una variazione dell'ormaia in funzione del raggio. Per questo motivo è stato calcolato un valore di deformazione permanente corretto per le configurazioni del Civis, Translohr e TVR che sono rispettivamente di 13,1 mm per il CIVIS, di 11,1 mm per il TVR e di 9,1 mm per il Translohr.

Attraverso questi valori si può fare una classificazione attraverso un coefficiente dato dal rapporto tra i valori di riferimento e quelli misurati (Tab. 3).

Attraverso questo coefficiente si misura l'aggressività che ha la ruota sulla pavimentazione. Analizzando questo rapporto si può notare come il sistema TVR mostra un coefficiente più alto della ruota di riferimento e quindi alla fine produrrà una deformazione maggiore, mentre la soluzione rappresentata dal Civis risulta la migliore.

Tab. 3 Coefficiente rappresentante l'aggressività della ruota sulla pavimentazione

Tipo	Rapporto	Coefficiente
ruota di riferimento	15,1/15,1	1,00
CIVIS	12,5/13,1	0,95
TVR	14,5/11,1	1,31
TRANSLOHR	10,5/9,1	1,15

3.4 WTM (Wheel Tracker Machine)

Il WTM o metodo della traccia delle ruote è utilizzato per determinare la tendenza di materiali bituminosi a deformarsi sotto carico. I provini possono essere condizionati in acqua o in aria; nello studio riportato, eseguito su provini di SMA e binder utilizzati per la costruzione della sovrastruttura del Civis, il procedimento utilizzato è quello che viene indicato in normativa europea UNI EN12697-22 come procedura B in aria.

I provini consistono in lastre di lunghezza 400 mm e larghezza 300 mm. Gli spessori delle lastre dipendono dalla tipologia di materiale utilizzato: 4 cm per lo SMA e di 6 cm per binder e base.

Le piastre sono state compattate con il compattatore a rullo (Fig. 9), fino allo spessore progettato.

Le lastre sono state posizionate sotto ad un pneumatico di larghezza pari a 50 mm realizzato in gomma solida, caratterizzato da una durezza prefissata, e la prova è stata eseguita ad una temperatura di 40 °C.

La suscettibilità di materiali bituminosi a deformarsi è stimata attraverso il solco formato dai passaggi ripetuti della ruota caricata a temperatura costante.

I cicli di carico sono stati impostati a 10.000; ogni ciclo di carico della ruota consiste in due passaggi: andata e ritorno. ➤



Fig. 9 Compattatore a rullo

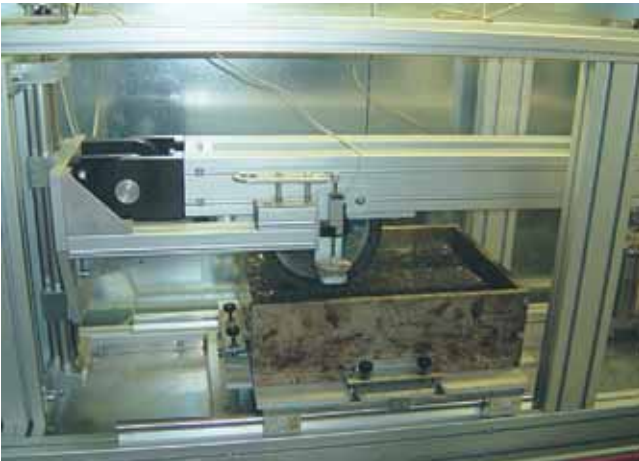


Fig. 10 Apparecchiatura di prova WTM

L'apparecchiatura per la prova è visualizzata nella Fig 10.

La deformazione del materiale espressa in millimetri dopo n cicli di carico viene chiamata dalla normativa di riferimento PRD_{AIR} . I valori di PRD_{AIR} per il materiale oggetto di studio ottenuti dalla prova di *wheel tracking* per 10.000 cicli sono riportati in Tab. 4.

Per la rappresentazione dei dati non sono state costruite delle curve di accumulo di deformazione in funzione del numero dei cicli, poiché vi sono state delle discrepanze nei valori rilevati. La deformazione tendeva a crescere si-

Tab. 4 Valori di PRD_{AIR}

Provino	PRD_{AIR} (mm)
SMA-1	1,11
SMA-2	0,97
BI-1	0,55
BA-1	0,66

no ad un certo punto per poi decrescere e successivamente continuare a ricrescere. Questo problema può essere dovuto al fatto che la macchina non rileva i valori di deformazione sulla lastra sempre nello stesso punto ed inoltre acquisisce i dati dell'accumulo di deformazioni ogni 250 cicli.

Per valutare una correlazione migliore, con i valori discreti, è stato pensato di mettere a confronto il numero di cicli con la percentuale dell'accumulo della deformazione, in scala logaritmica, ottenendo una relazione con la quale è possibile determinare la deformazione dell'ormaiamento in funzione del numero di cicli ed il parametro WTS_{AIR} richiesto dalla normativa. Mettendo le grandezze considerate su scala logaritmica si ottiene una concentrazione dei valori di deformazione, rilevati durante la prova, attorno ad una retta. Attraverso l'equazione della retta è stato possibile costruire delle curve continue di deformazione per ogni tipologia di materiale con un errore del 4% (Fig. 11).

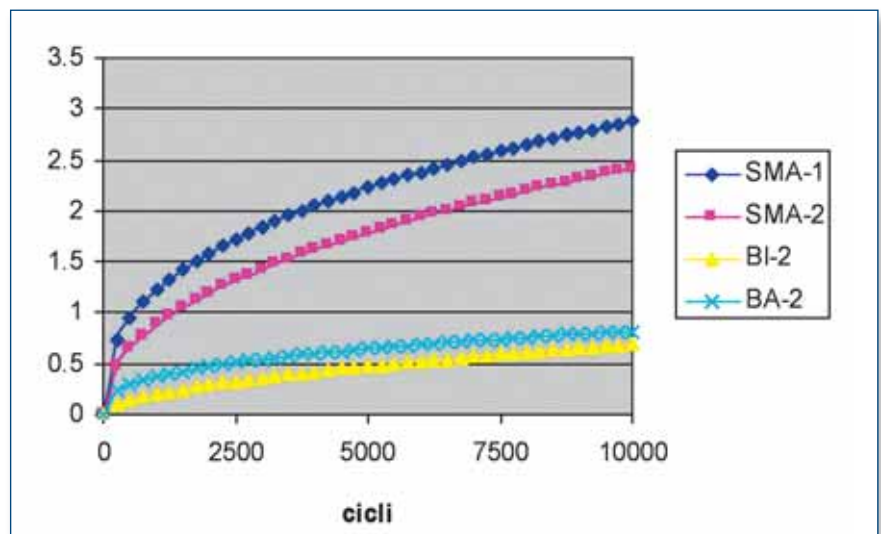


Fig. 11 Curve di deformazione dei materiali

4. Confronto tra FRT e WTM

Sia la prova di *wheel tracking* effettuata in laboratorio, sia la prova eseguita in Francia applicano al provino circa la stessa pressione di 1.000 KPa. Per questo motivo sono state messe a confronto per verificare se ci potessero essere delle correlazioni.

E' stata misurata l'area di contatto per la ruota del macchinario di laboratorio, in particolare la larghezza è stata supposta variabile da 0,5 cm a 1,2 cm in funzione della temperatura assunta, ossia 20 e 50 °C.

In generale si può affermare che maggiore è la temperatura e maggiore risulta l'area di contatto, mentre l'area d'impronta della ruota del Civis è pari a 966 cm² ed è stata calcolata negli studi condotti in Francia.

Le prove eseguite nel presente studio sono state effettuate per 10.000 cicli di carico, dove ad un ciclo corrispondono 2,28 secondi, mentre per le prove eseguite al LCPC la macchina percorre sei cicli il minuto. Il confronto tra le due prove per lo strato di usura che risulta essere quello più soggetto al fenomeno dell'ormaiamento è riportato nella Fig. 12.

Se si prendono in considerazione le deformazioni accumulate permanenti a 10.000 cicli, tempo di fine prova per i campioni testati in laboratorio, tali deformazioni sono paragonabili, anche se il materiale su cui sono state eseguite le prove è diverso ed inoltre la prova di laboratorio viene fatta sul singolo strato ipotizzando che

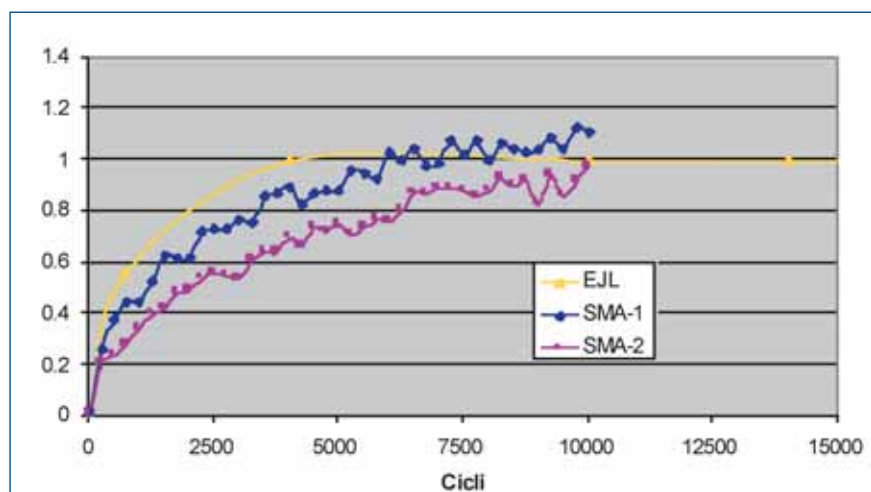


Fig. 12 SMA: confronto tra la prova di wheel tracker eseguita in laboratorio e la prova eseguita al LCPC

quello sottostante sia infinitamente rigido, mentre la prova eseguita in Francia è stata eseguita su una pavimentazione reale.

5. Conclusioni

Nell'articolo sono state prese in considerazione alcune delle prove per la determinazione delle deformazioni permanenti tramite simulatori di traffico. Con prove di *wheel tracking* di laboratorio sono stati determinati i valori delle deformazioni permanenti su campioni di conglomerato bituminoso di binder ed usura SMA impiegati nella pavimentazione del Civis di Bologna ed esposti quelli di prove in scala reale eseguite in Francia. In un successivo articolo saranno presentati ulteriori considerazioni e approfondimenti tra valori di deformazione permanente ottenuti con prove di *creep* statico, *creep* dinamico e d'impronta.

Bibliografia

- Gramsammer C., Kerzreho P., Balay, *L'essai d'ornierage TVM sur le Manège de Fatigue du LCPC*, Rapport d'étude, 2-12-1999.
- Tesi di Sabrina Grillini, relatore Prof. Ing. Andrea Simone, correlatori Ing. Cesare Sangiorgi, Ing. Fabio Picariello ed Ing. Andrea Cocurullo, *Studio sperimentale per la caratterizzazione della resistenza alle deformazioni dei conglomerati bituminosi impiegati nella sovrastruttura della linea TPGV (Civis) di Bologna.*
- UNI EN 12697-22 *Miscele bituminose del 2004. Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 22: "Metodo della traccia delle ruote (Wheel tracking)"*.
- Prof. Ing. Ettore VOLTA B.G., Ing. Cesare Sangiorgi, *Progettazione esecutiva delle sovrastrutture stradali delle corsie del sistema TPGV (Civis) di Bologna.*